

ANÁLISIS DEL AMORTIGUAMIENTO EN VIDRIO ESTRUCTURAL BAJO CARGAS DE IMPACTO

A. Ramos^{1,*}, F. Pelayo¹, M.J. Lamela¹, A. Fernández Canteli¹
C. Huerta², A. Pacios²

¹ Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación.
Universidad de Oviedo. Campus de Viesques. 33203 Gijón, España.
* E-mail: ramosfalberto@uniovi.es.

² Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales.
E.T.S. de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.
C/ José Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid, España.

RESUMEN

Los últimos avances tecnológicos y las tendencias arquitectónicas actuales han impulsado notablemente el uso de una gran variedad de productos de vidrio en la construcción que, en función de sus propias características, permiten diseñar y calcular elementos estructurales de este material bajo condiciones de seguridad. Este trabajo presenta la evaluación y el análisis de las propiedades de amortiguamiento de placas rectangulares de vidrio laminado de 1938 mm x 876 mm con distinto espesor, según el número de capas intermedias de PVB dispuestas. Mediante simulación numérica por elementos finitos y su posterior comprobación experimental, utilizando análisis modal, se determinaron las frecuencias naturales y el amortiguamiento de las placas de vidrio, tanto en condiciones de contorno libre, como en condiciones operacionales del equipo de ensayos de impacto utilizado en el programa experimental, siguiendo las especificaciones de la norma europea UNE-EN 12600:2003.

ABSTRACT

The latest technology and architectural trends have significantly improved the use of a large variety of glass products in construction which, in function of their own characteristics, allow to design and calculate structural glass elements under safety conditions. This paper presents the evaluation and analysis of the damping properties of rectangular laminated glass plates of 1938 mm x 876 mm with different thickness depending on the number of PVB interlayers arranged. By means of numerical simulation and experimental verification, using modal analysis, natural frequencies and damping of the glass plates were calculated, both under free boundary conditions and operational conditions for the impact test equipment used in the experimental program, as the European standard UNE-EN 12600:2003 specifies.

PALABRAS CLAVE: Vidrio estructural, péndulo de impacto, amortiguamiento.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el desarrollo de nuevas técnicas de post-procesado del vidrio, la mejora en su producción así como la posibilidad de realizar análisis y cálculos estructurales mediante técnicas numéricas como el método de los elementos finitos ha favorecido la mayor utilización del vidrio como material estructural. Dentro de los avances en los vidrios está la

posibilidad de fabricar vidrios laminados. El vidrio laminado presenta una estructura tipo sándwich formada por una o varias capas de vidrio unidas mediante capas intermedias de un material polimérico que le confieren una serie de propiedades, en comparación con los vidrios monolíticos (una única capa de vidrio), que han llevado a la sustitución de éste último en diversas aplicaciones. Una de las ventajas más significativas de los vidrios laminados es el incremento en la seguridad

que ofrecen ya que al producirse la fractura de las capas de vidrio, éstas se mantienen pegadas a la capa polimérica [1]. Otras ventajas destacadas de los vidrios laminados es la mayor capacidad de aislamiento tanto acústico como térmico.

Aunque sus ventajas resultan atractivas, el cálculo y modelización del comportamiento del vidrio laminado resulta complejo debido a la combinación de un material rígido, como es el vidrio, con un material flexible como es el de la capas poliméricas. El material polimérico más utilizado es el polivinil-butiral (PVB) que presenta un comportamiento viscoelástico característico por presentar una dependencia de sus propiedades mecánicas, por ejemplo, con la temperatura y la frecuencia (o tiempo) [2,3].

En este trabajo se analiza el comportamiento dinámico del vidrio laminado en ensayos de impacto según la norma UNE-EN 12600:2003 [4] en función del espesor de la capa de PVB utilizada.

2. COMPORTAMIENTO DEL VIDRIO LAMINADO.

El vidrio laminado forma una estructura tipo sándwich compuesta por capas de vidrio, cuyo comportamiento se suele considerar elástico-lineal [2] y capas intermedias, generalmente de PVB, que presentan un comportamiento viscoelástico-lineal. A pesar de que el espesor de la capa de PVB es considerablemente menor que el espesor total del laminado, por ejemplo 15 veces menor en un vidrio de 3+0,38+3 mm (siendo 3 y 0,38 mm los espesores de vidrio y PVB, respectivamente) la influencia del polímero en parámetros como el amortiguamiento puede ser significativa en comparación con un vidrio monolítico de espesor equivalente.

El comportamiento viscoelástico se puede entender de manera sencilla si se tiene en cuenta que estos materiales presentan propiedades comunes a los sólidos elásticos y a los fluidos viscosos, representados habitualmente por muelles y émbolos, respectivamente [5]. Factores como la temperatura, la presión o la frecuencia (o tiempo de aplicación de la carga) influyen en estos materiales de manera que, por ejemplo, a bajas temperaturas o cargas de alta frecuencia, la parte elástica tiene mayor peso que la viscosa y viceversa [6].

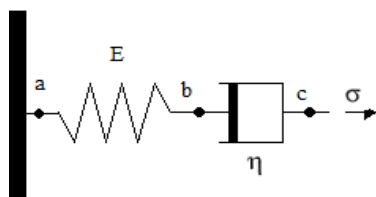


Figura 1. Modelo de Maxwell

Un ejemplo sencillo de modelo viscoelástico es el modelo de Maxwell dado por un muelle (comportamiento elástico) y un émbolo (comportamiento viscoso) colocados en serie (ver Figura 1).

La respuesta del material frente a carga dinámicas, como las debidas a impactos, viene dada por el módulo complejo del material $E^*(\omega)$ que se puede representar mediante su parte real, $E'(\omega)$, conocida como el módulo de almacenamiento y relacionada con la capacidad elástica del material y su parte imaginaria, $E''(\omega)$, conocida como el módulo de pérdidas y relacionada con la capacidad disipativa del material. En el modelo de Maxwell ambas componentes vienen dadas por las siguientes expresiones [7]:

$$E'(\omega) = \frac{\eta^2 \omega^2 E}{\eta^2 \omega^2 + E^2} \quad (1)$$

$$E''(\omega) = \frac{\eta \omega E^2}{\eta^2 \omega^2 + E^2} \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia, E es la rigidez del muelle y η el coeficiente de viscosidad del material. La relación entre ambas componentes es conocida como el factor de pérdidas (o tangente de pérdidas $\tan\delta$):

$$\eta(\omega) = \frac{E''(\omega)}{E'(\omega)} \quad (3)$$

que se puede relacionar con el índice de amortiguamiento modal ζ mediante la relación [8]:

$$\eta = 2 \cdot \zeta \quad (4)$$

Dicha relación proporciona buenos resultados para sistemas con amortiguamiento relativamente bajo, siendo los errores menores del 5% cuando $0 < \eta < 0,3$ [9]. En la figura 2 se representan los valores de los módulos $E'(\omega)$ y $E''(\omega)$ conjuntamente con el valor del factor de pérdidas $\eta(\omega)$ para el PVB en función de la temperatura. De la figura 2 se observa como la capacidad de amortiguamiento del PVB, representada por el factor de pérdidas ($\tan\delta$ en la figura 2), depende fuertemente de la temperatura.

Por otro lado, el comportamiento viscoelástico también depende de la presión a la que está sometida el material [5], presentando así mayor rigidez a medida que aumenta la presión a la que está sometido, es decir, se produce un aumento de la componente real $E'(\omega)$ frente a la imaginaria $E''(\omega)$, lo que implica un factor de pérdidas más bajo (ver ec. 3) o lo que es lo mismo una reducción en la capacidad de amortiguamiento del vidrio laminado. Este efecto de presión podría ser más acusado en vidrios laminados de espesores de PVB pequeños, por ejemplo, formado de una única capa de

0,38 mm, donde las fuerzas de adherencia creadas entre los dos materiales en el proceso de fabricación pueden someter a un estado residual de compresión la capa de PVB. Este efecto se puede reducir en vidrios laminados con mayor espesor de PVB, donde se podría producir la relajación del material en puntos cercanos al plano central de la capa; puntos menos influidos por las fuerzas de adherencia.

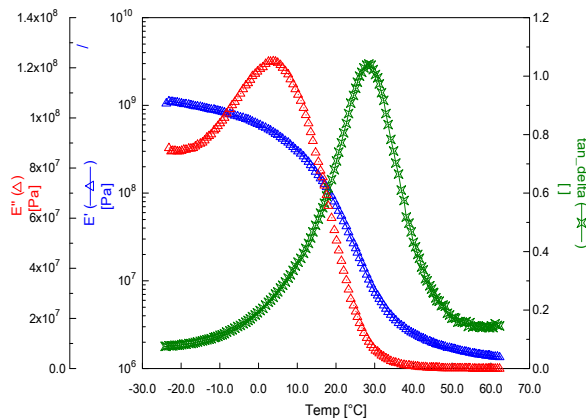


Figura 2. Módulos de almacenamiento E' , de pérdidas E'' y $\tan \delta$ del PVB.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Probetas

En los ensayos experimentales, se utilizaron dos tipos de placas de vidrio: monolíticas y laminadas. Las dimensiones de las placas fueron de 1938 mm de alto y 876 mm de ancho siendo el espesor del vidrio monolítico de 10 mm de espesor, de acuerdo con la norma europea EN 12150-1:2000 [9]. En los vidrios laminados se utilizaron placas con 3 capas en configuración: Vidrio+PVB+Vidrio con las siguientes dimensiones (en mm): 5+0,38+5 y 5+1,52+5 y denominadas con los nombres "Lam 1" y "Lam 2", respectivamente.

3.2. Banco de ensayos

En los experimentos se utilizó un banco de ensayos para llevar a cabo tests de impacto según la norma UNE-EN 12600:2003 [4] la cual describe la metodología de ensayo para la clasificación de vidrio plano en edificación mediante ensayo pendular.

Sobre el marco de ensayos se realizaron algunas mejoras sobre las indicaciones básicas descritas por la norma con el objetivo de conseguir mayor precisión, repetitividad y versatilidad. Por un lado se independizó el péndulo de impacto y el banco de ensayos y, por otro lado se implementó un sistema de medida de ángulos mediante encóder que permite de manera sencilla fijar y

posicionar el péndulo a la altura deseada. Por último se añadió un dispositivo de liberación automática del péndulo mediante un electroimán.

3.3. Ensayos

Los ensayos se dividieron en dos partes: a) análisis modal de la placa dispuesta en el marco del banco de ensayos, y b) ensayos de impacto sobre el mismo banco. El objetivo de ambos ensayos es, por un lado, analizar la respuesta dinámica de las placas (frecuencias, modos de vibración e índices de amortiguamiento) y por otro lado, facilitar la interpretación de la respuesta de las placas ante los impactos.

En los ensayos de análisis modal, se utilizaron 8 acelerómetros de 100 mV/g (PCB-333B32). El registro de las aceleraciones durante los ensayos se realizó mediante un Chassis cDAQ-9188 equipado con 2 módulos de Aceleración NI 9234 y una frecuencia de muestreo de 2132 Hz. En los ensayos se utilizó excitación artificial sobre la placa utilizando dos martillos modales con cabeza plástica.

La respuesta de las placas en los ensayos de impacto se registró mediante acelerómetros de 10 mV/g (PCB-352C15) fijados mediante bases pegadas a las placas de vidrio. En dichos ensayos se utilizó una configuración diferente, colocándose 6 acelerómetros en la placa, un acelerómetro en el péndulo y dos en la estructura del banco de ensayos. Adicionalmente se colocó una roseta de galgas extensométrica (0° - 45° - 90°) en el centro para medir las deformaciones producidas durante el impacto.

El registro de las señales se realizó, en este caso, con el mismo equipo utilizado en el análisis modal de la placa al que se le añadió un módulo NI-9235 para mediciones de extensometría. En los ensayos de impacto se utilizó una frecuencia de muestreo de 10240 Hz.

De acuerdo con la norma UNE-EN 12600-2003 [4], se realizaron impactos a tres alturas de caída respecto a la posición de reposo del péndulo (190, 450 y 1200 mm), y adicionalmente a alturas intermedias de 25, 50, 75, 100, 200, 250, 300, 600, 750 y 1000 mm, siempre que no tuviese lugar la rotura del vidrio. A cada una de las alturas se llevó a cabo un ensayo de impacto simple y un ensayo de doble impacto, en el cual, el péndulo golpea la placa y se deja oscilar libremente hasta que se produce el segundo impacto, momento en el cual se detiene el péndulo.

En cada ensayo se tiene en cuenta la máxima respuesta de los acelerómetros, el tiempo entre impactos, el tiempo de atenuación de la respuesta de las placas hasta el estado de reposo tras el impacto y la deformación máxima de la galga.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Análisis modal de las placas en el marco de ensayos

En este apartado se presentan los resultados del análisis modal de las placas fijadas sobre el marco del banco de ensayos.

El análisis modal de las placas se realizó utilizando únicamente las respuestas de las placas (análisis modal operacional) y utilizando la aplicación ARTeMIS EXTRACTOR. La identificación de los parámetros modales se realizó mediante la técnica de análisis en frecuencia: EFDD [10].

Las frecuencias naturales obtenidas para las tres placas se presentan en la Tabla 1.

De los valores obtenidos se puede observar como la placa laminada, presenta frecuencias más bajas que la placa monolítica de espesor similar. En el caso de la respuesta del vidrio laminado, la respuesta ante cargas de alta frecuencia, como son las de cargas de impacto, es como la un vidrio monolítico de espesor la suma de las tres capas del vidrio laminado [11]. En este caso una medida de los espesores de ambas placas reveló como la placa monolítica tenía un espesor total de 10,15 mm mientras que el espesor total del laminado, teóricamente de $5+0,38+5$ es de 9,86 mm, lo que justifica los resultados obtenidos de la tabla 1.

En el caso del vidrio laminado con espesor de PVB de 1,52 mm, el espesor total del vidrio monolítico equivalente hace que su respuesta en frecuencia sea más elevada, mayor rigidez efectiva [11] y, por lo tanto, se obtengan frecuencias naturales más elevadas (ver tabla 1).

Tabla 1. Frecuencias naturales de las placas colocadas en el marco de ensayos.

Modo	Frecuencia natural [Hz]		
	Monolítica	Lam 1	Lam 2
1	37,39	37,01	40,86
2	56,02	54,83	57,35
3	67,15	64,19	66,20
4	90,05	89,02	99,26

Los índices de amortiguamiento obtenidos del análisis modal operacional mediante la técnica de EFDD se presentan en la tabla 2.

Si se comparan los valores de amortiguamiento en función de si se tiene o no la capa de PVB en el vidrio, los resultados obtenidos muestran un aumento del amortiguamiento, por un lado comparando el vidrio monolítico con el laminado de espesor similar (Lam 1)

y, en segundo lugar, al incrementar el espesor de la capa de PVB (Lam 2), donde el aumento del amortiguamiento es más significativo (ver Tabla 2).

Tabla 2. Índices de amortiguamiento de las placas en el banco de ensayos.

Modo	Índices de amortiguamiento [%]		
	Monolítica	Lam 1	Lam 2
1	1,058	1,144	1,808
2	0,909	0,999	1,420
3	0,756	1,039	2,060
4	0,632	0,856	2,167

En la variación del amortiguamiento con la frecuencia, se observa tanto en la placa monolítica como en la placa laminada "Lam 1" una tendencia a disminuir el amortiguamiento con la frecuencia, en general esta tendencia en ambos casos debería de ser inversa [12] lo que induce a pensar que algún mecanismo de disipación del marco de ensayos puede estar influenciando los resultados. Adicionalmente en el caso del vidrio monolítico, en ensayos previos sobre la placa en condiciones de apoyo libre-libre para la calibración del marco de ensayos [1,4] se conoce que los índices de amortiguamiento son del 0,3 % o inferiores, lo que reafirma que los valores obtenidos así como la tendencia observada en los ensayos sobre el marco son mayores de lo esperado para el caso monolítico y aunque en menor medida, también para los índices de amortiguamiento obtenidos en el vidrio laminado de menor espesor. Este comportamiento puede estar justificado debido a la sujeción mediante las bandas de goma que se utiliza en el marco de ensayos para sujetar las placas al mismo. En el caso del vidrio laminado "Lam 2" se observa como el amortiguamiento si aumenta con la frecuencia. Esta diferencia de comportamiento con las otras dos placas puede ser debida a la mayor capacidad disipativa de la placa frente al efecto de amortiguamiento introducido por las bandas de goma de sujeción

4.2 Ensayos de impacto

En caso de ensayos de impacto simple a distintas alturas se analizan los valores de aceleración máxima registrada en el impacto, la aceleración máxima registrada por el péndulo producida al impactar y, finalmente, se realiza una estimación del tiempo que tarde en atenuarse la vibración en la placa. Para calcular este parámetro de atenuación, que proporciona una medida indirecta de la capacidad de amortiguamiento de las placas, se calcula el tiempo que transcurre entre el máximo de la señal de aceleración en el impacto y el de un valor en la señal de aceleración de un 95% más bajo. Los resultados obtenidos para una altura de impacto de 100 mm en las tres placas se presentan en la tabla 3. De los resultados obtenidos se observa como la aceleración registrada en

la placa monolítica es más elevada que en las dos placas de vidrio laminado y, además, en este último caso, la aceleración es más baja a medida que aumenta el espesor de PVB. Aunque la respuesta observada anteriormente en las placas, ver tabla 1, es que a mayor espesor equivalente de la placa mayor rigidez. En la respuesta ante impacto esta tendencia parece invertirse, sin embargo hay que tener en cuenta que las aceleraciones no se miden en la cara donde se realiza el impacto, sino en la cara opuesta, por lo que los resultados obtenidos indican la atenuación que el PVB confiere a la respuesta de la placa siendo mayor la atenuación a mayor capa de PVB.

A través de la medida de aceleración del péndulo en el instante en que se produce el impacto, se puede ver como la aceleración es mayor a mayor espesor equivalente, resultado éste, por lo tanto, acorde con los valores obtenidos en las frecuencias naturales de las placas debido a que la aceleración del péndulo se mide sobre la cara del vidrio que recibe el impacto.

En relación al tiempo de atenuación del 95% del valor de la señal los resultados obtenidos (ver tabla 3) son acordes con los resultados obtenidos a través del análisis modal operacional de las placas: a mayor espesor de PVB, mayor amortiguamiento del vidrio, y por lo tanto, menos tiempo tarda la onda de impacto en atenuarse.

Tabla 3. Datos obtenidos en el impacto simple para una altura de caída de 100 mm.

Aceleración	Monolítica	Lam 1	Lam 2
Máx. [g]	8,560	8,252	7,070
Péndulo [g]	7,002	7,103	7,241
Tiempo de atenuación (95%) [s]	4,578	4,042	3,752

En los ensayos de doble impacto se observa como el tiempo transcurrido entre el primer y el segundo impacto (ver tabla 4) aumenta con el espesor de la capa de PVB. Este resultado reafirma como el comportamiento del vidrio laminado frente a cargas de impacto se puede asimilar al de un vidrio monolítico de espesor equivalente dado que un mayor tiempo entre los impactos se produce si el rebote del péndulo es de mayor altura, hecho producido por un impacto contra una estructura más rígida.

Tabla 4. Datos obtenidos en el doble impacto

Aceleración	Monolítica	Lam 1	Lam 2
Péndulo1 [g]	5,889	5,798	5,995
Péndulo2 [g]	4,890	4,777	4,922
T entre impactos [s]	1,372	1,389	1,405

A partir de las respuestas en aceleración de la placa ante cargas de impacto, ver figura 3, se realizó una estimación del amortiguamiento mediante la técnica del decremento logarítmico. Los valores obtenidos para las tres placas para una altura de impacto de 100 mm se presentan en la tabla 5. Aunque la respuesta de la placa para un impacto en el centro se debe principalmente a la colaboración del primer modo de vibración (± 38 Hz), la diferencia de amortiguamiento observada entre los valores de la tabla 2 y 5 se puede deber a la colaboración añadida del tercer modo de vibración (± 90 -100 Hz) que, al igual que el primero, tiene un nodo de amplitud máxima en el punto central y, por lo tanto se puede excitar fácilmente para este tipo de carga. En la figura 4 se representa la densidad espectral de la respuesta de la placa ante un impacto donde se puede ver como en la respuesta ante impacto se excitan fundamentalmente los modos correspondientes al primer y tercer modo, 38 y 90-100 Hz, respectivamente.

Tabla 5. Índices de amortiguamiento obtenido en el impacto.

Frec [Hz]	Monolítica	Lam 1	Lam 2
Modo 1	1,197	1,089	1,985

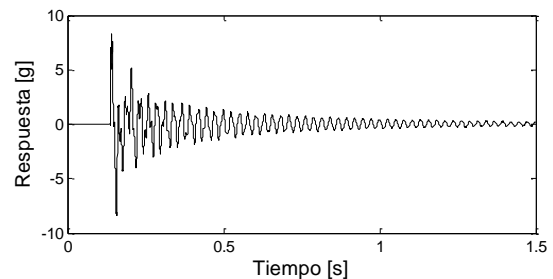


Figura 3. Ejemplo de respuesta de las placas ante un impacto.

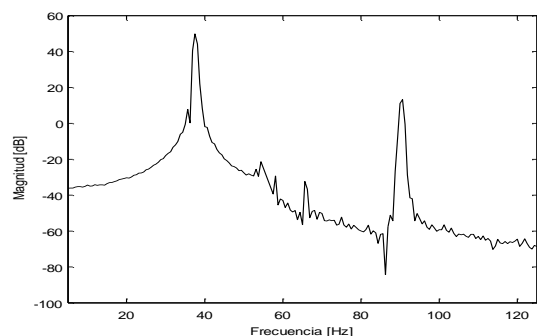


Figura 4. Ejemplo de densidad espectral de la respuesta de las placas en el ensayo de impacto.

Por último, a partir de la serie completa de ensayos a diferentes alturas se observa como el comportamiento del vidrio laminado con la altura del impacto sigue una tendencia lineal lo permite mantener para este tipo de

cargas las hipótesis de cálculo lineal y viscoelástico-lineal para el vidrio y PVB, respectivamente.

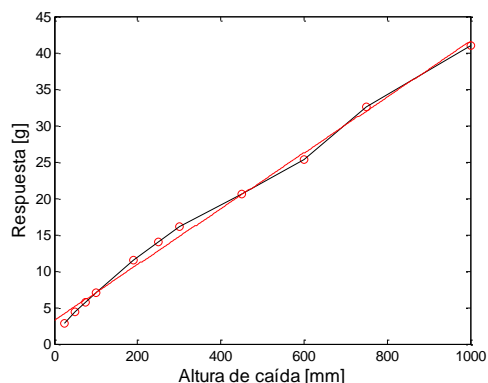


Figura 5. Relación entre la altura de caída del péndulo y la respuesta del vidrio laminado (capa de 0,38 mm de PVB)

5. CONCLUSIONES

A través de los parámetros modales de las placas en condiciones de operación, se puede estimar su comportamiento frente a cargas de impacto, facilitando así la calibración de un modelo numérico para este tipo de ensayos.

Los resultados de este trabajo demuestran la influencia del espesor de la capa intermedia del PVB en la capacidad de amortiguamiento del vidrio. Sin embargo para laminados con espesores bajos de PVB, dicha influencia puede ser del mismo orden que la introducida por elementos flexibles de fijación de la placa.

En el estudio de tensiones, deformaciones y desplazamientos de placas de vidrio sometidas a carga de impacto es necesario considerar no sólo la colaboración del primer modo de vibración sino también la del tercero, dado el tipo de excitación realizada.

En los ensayos de impacto sobre vidrios laminados se ha obtenido una relación lineal entre la respuesta de la placa y la magnitud del impacto. Esto permite utilizar las hipótesis de comportamiento lineal y viscoelástico-lineal para el vidrio y el PVB, respectivamente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación recibida del Plan Nacional y Regional de Investigación, a través de los proyectos BIA2010-19920, BIA2011-28959 y SV-PA-11-012, y del Ayuntamiento de Gijón, mediante una beca del IUTA.

REFERENCIAS

- [1] Claramunt R., Postigo S., Perera R., Pacios A., Ros A., Huerta C., Seguridad ante impacto humano de acristalamientos en edificaciones. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. 2005.
- [2] Bennison, S., J., Jagota, A., Smith, A., Fracture of Glass/Poly (vinyl butyral) (Butacite). Laminates in Biaxial Flexure, Journal of American Society, 1761-70. 1999.
- [3] F. Pelayo, M.J. Lamela-Rey, A. Fernández-Canteli, J. García-Barrueta, F. Cortés, y J.M. Abete. "Métodos de conversión tiempo-frecuencia para la aplicación del principio de correspondencia en materiales viscoelástico-lineales". Anales de Mecánica de la Fractura 28, Vol. 2. 2011.
- [4] UNE-EN 12600-2003. "Vidrio para la edificación. Ensayo pendular. Método de ensayo al impacto y clasificación para vidrio plano". Asociación Española de Normalización y Certificación. 2003.
- [5] Ferry, J.D., Viscoelastic Properties of Polymers, Third ed., John Wiley & Sons, Ltd., New York. 1980.
- [6] Lakes, R.S., "Viscoelastic Solids", CRC Mechanical Engineering Series, Ed. Kulacki, F.A. CRC Press, 1998.
- [7] Tschoegl, N.W., The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior, Springer-Verlag, Berlin. 1989.
- [8] Jones, D.I.G., Handbook of viscoelastic vibration damping, John Wiley & Sons, Ltd., New York. 2001.
- [9] UNE-EN 12150-1:2000. "Vidrio para la edificación. Vidrio de silicato sodocálcico de seguridad templado térmicamente. Parte 1: Definición y descripción". 2000.
- [10] Brincker, R., Zhang, L-M., and Anderson. P., "Modal Identification from Ambient Response Using Frequency Domain Decomposition," in: Proceedings of the 18th IMAC, pp. 625-630. 2000.
- [11] Ross, D., Ungar, E.E., and Kerwin, E.M., "Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Laminate," Structural Damping, ASME, pp. 49-88. 1959.
- [12] Operational Modal Analysis on laminated glass beams, M. López Aenlle, F. Pelayo, A. Fernández Canteli, J. Barredo, L. Hermanns, A. Fraile. In the proceedings of the 4th International Operational Modal Analysis Conference, IOMAC. Istanbul, 2011.